

(別紙 2)

建設技術研究開発費補助金総合研究報告書

1. 研究課題名 地中に埋設される排水管 (FRPM 管) の樹脂モルタル部分の亀裂を配管内部に紫外線を照射することで検知する塗装工法の開発
2. 研究期間 平成 26 年度～平成 27 年度
3. 代表者及び研究代表者、共同研究者

代表者	高橋康一	プラナスケミカル株式会社・代表取締役
研究代表者	高橋康一	プラナスケミカル株式会社・代表取締役

4. 補助金交付総額 24,250,000 円

5. 研究・技術開発の目的

北海道のような寒冷地において、地表にある鉄筋コンクリート製の排水路は冬季間の土壌凍結や水路内の水の凍結等のためにしばしば破壊されてきた。これを防ぐための方策として、凍結被害を受けにくい地中に排水管を埋設 (Fig. 1) することを国土交通省北海道開発局管内の国営土地改良事業で行い、農業に欠かせない用排水の確実な維持を目指した。その配管で口径が2m以上のものはFRPM管が使用され、平成25年7月における総延長は104Kmである。(北海道開発局から聞き取り)

その排水管の埋設工事が進む中で、これからは、長寿命化の為のメンテナンスが不可欠となる。そのためには、配管内の点検を簡便、安価に行なうことが課題とされている。

FRPM管は樹脂モルタルを主部材としてその管外面、管内面にFRP (ガラス繊維補強樹脂) による補強を行った構造となっている。(Fig. 2) その劣化はその構成部材である樹脂モルタルの亀裂であるが、FRP層で覆われているが為に目視点検では、基本的にその亀裂を発見できない。従来、埋設されたFRPM配管の劣化検査は、配管内の水が無い時期に熟練した点検者が直径2～3mの配管内に入り行われる。配管内は照明がなく、照明を移動しながらの点検となる。近年は超音波による劣化診断という方法も使用されるが、高額な機材を用いる検査だが点検速度も遅く、精度がさほど高くないのが現状で、最終的には点検者が管内の全領域の内径の測長によりたわみ率を算出する劣化点検が必要で、長時間の点検と莫大な人件費を要することになる。しかも、点検者の熟練度による検査精度のバラつきや、過酷条件下での疲労による見落としなどの、点検ミスが避けられないという問題点もある。この劣化点検を、配管内部を踏査しながら目視点検にてスピーディに行える工法を研究開発することで、点検困難箇所のFRPM管の異常検知を、簡便で安価に行える点検方法の確立をする。



Fig. i 埋設工事風景

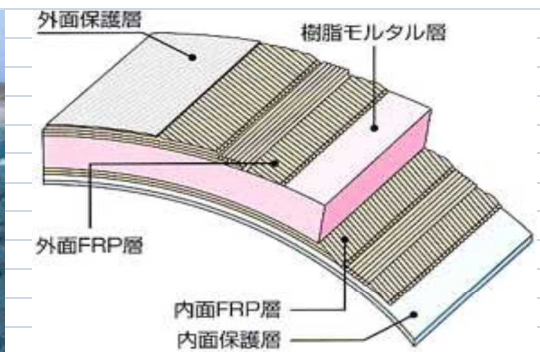


Fig.2 FRPM 管の構成

6. 研究・技術開発の内容と成果

F/S では以下の事を行った。

地中に埋設された排水管 (FRPM 管) の樹脂モルタル部分の劣化を目視点検でスピーディに行える工法の研究開発で、現在は目視点検できない点検困難箇所の異常検知を、簡便で安価・正確に行える点検工法の確立を目指した。

弊社基幹技術の「コンクリート構造物のひび割れ検出塗装システム」(NETIS 登録 CB-120002-A) の基本原理 (基材に 2 層の塗膜を形成し、下塗りは柔軟で蛍光顔料を含有する塗膜、上塗りは硬度が高く紫外線を吸収する顔料を含有した塗膜とする。基材にひび割れ等が生じると下塗り塗膜は柔軟で破断せずに上塗り塗膜は固く、ひび割れを生じる。この部分に紫外線を照射すると下塗り層が露呈されている部分の蛍光顔料が励起され発光することでひび割れを検出する) を応用した FRPM 管樹脂モルタル部の亀裂検出のための塗料の開発を行った。

当初、1 層目は FRPM 管の内面の FRP 層に強固に付着し耐水性がある塗料 (プライマー)、2 層目はプライマーに強固に付着し、FRPM 管が圧縮変形しても亀裂が入らない弾性がある耐水性塗料 (弾性下塗り塗料)、3 層目は弾性下塗り塗料に強固に付着し、FRPM 管が圧縮変形時に塗膜に亀裂が入る硬度を有し、紫外線を遮断する顔料が均一分散された耐水性塗料 (硬質上塗り塗料) の要素技術を開発した。FRP 層の不飽和ポリエステルに強固に付着して耐水性、弾性を有する塗料が開発できたので、プライマーとひび割れ検出下塗り塗料は一体化して下塗り弾性塗料とした。

硬質上塗り塗料は FRPM 管の状態は目視では検出できないことから弊社基幹技術の透明塗膜ではなく、カーボンブラックという顔料を塗料に添加して紫外線を遮光した。また、塗料中にはマイクロオーダーのケイ素系フィラーを添加することで、塗膜の表面が滑らかであるが硬質で脆さを付与して割れやすい塗膜を設計した。塗料材料は地中の閉鎖空間で施工した場合でも、有機溶剤中毒の心配が無い無溶剤材料とした。主剤量は耐水性、耐薬品性が高く、付着性も高い 2 液硬化型のエポキシ樹脂材料とした。

FRPM 管試験体 (内径 500mm×幅 150mm と内径 900mm×幅 150mm の 2 種類) に対し、管内面に試作開発した弾性下塗り塗料を 400 μ m、硬質上塗り塗料を 200 μ m にて塗装し、常温で 1 週間養生したものを、産学官委員会の一員である名古屋市工業研究所が所有する変位-荷重計 (オートグラフ) に円筒方向を変形させる様に設置して荷重をかけた。FRPM 管の構成部材の樹脂モルタルが破壊される前の段階の一定以上の変形 (内径の 8% 前後、内径 500mm ならば 40mm) により構成した塗膜の硬質上塗り塗膜に円筒の長手方向にひび割れが生じ、紫外線の照射で明瞭に発光した。明瞭な発光が確認されたことで、塗装の基本構成及び、材料選定の方向性が間違っていないことが確認できた。しかし、想定していた FRPM 管の樹脂モルタルの亀裂の発生時には FRP 層だけでなく FRPM 管自体が破壊されることも判明したので研究の方向を再考した。日本下水道協会の規格において FRPM 管の設置における設計たわみ量の許容値が 5% であることに着目し、変形のたわみ量が 5% 前後で亀裂が入り、紫外線によって発光する塗料の研究に切り替えた。

円弧状に切断した新品の FRPM 管試験体の内径側に開発した弾性下塗り塗料 400 μ m と硬質上塗り塗料 200 μ m の 2 層を塗装し、常温で 1 週間既養生したものの塗膜側に建研式引張り試験用の \square 40mm の 3 ケの鉄製アタッチメントをエポキシ接着剤にて貼り付け引張り試験を行なった。(Fig. 3) 3 検体の付着強度の平均は 7.25KN/(40X40)=4.53N/mm² であり、FRPM 管の内部材料の樹脂モルタルでの母材破壊 (FRP の表層が剥がれて、グラスファイバーが露出状態) であった。



Fig.3 新品の FRPM 管での付着力試験

次に、積水化学工業(株)より提供された農業用排水管に 35 年供用された堀上 FRPM 管で薄膜状の汚れが付着した状態のものに、同じ塗料を既定の厚みで塗装し、養生後に建研式引張り試験を行なった。FRPM 管が乾燥状態時の塗装の場合、3 検体平均で 3.70N/mm² の付着強度があり、FRP 層での母材破壊で、湿潤状態時の塗装でも 3 検体平均で 2.973N/mm² の付着強度があり、2 検体は FRP 面からの界面剥離で、1 検体は FRP 層での母材破壊であった。(Fig. 4) 湿潤状態でも成膜可能で付着強度としても コンクリート防食協会における下水道用コンクリートの防食被覆材の規格で A 種塗布型ライニング工法と B 種塗布型ライニング工法で付着強度の合格値が 1.5 N/mm² に対して倍近い付着強度がある本塗料は十分に実用可能と考える。



Fig.4 汚れが付着した FRPM 管での付着力試験

この開発を具現化するために埋設された FRPM 管の維持点検に関して点検の発注者である東京都下水道局、北海道開発局、点検の受注者である建設コンサルタント会社、点検の商材を販売する建材商社 そして FRPM 管製造メーカー、及び本研究の応用範囲を調査するために東京電力において聞き取り調査を行い現場ニーズの吸い上げを行った。各調査場所では本研究開発工法に対し大きな関心を示し、担当者との実用化による経済的メリット、適応箇所、要求性能の質疑応答で、有用性が理解され早期の実用化が望まれた。また、当初は想定していなかった施工条件が判明し、具体的な開発・検証事項が露わになった。更に本工法と茨城大学の有吉教授の提案するデプスゲージによる歪測定などの点検工法との組み合わせで、より実用性の高い工法が明確になった。

これら F/S の成果から事業化を見据えた今後の研究必要項目として以下を R&D で研究した。

- 1) 気温 5℃湿度 80%環境で、下塗り塗装後に 18 時間以内で上塗り塗装が可能なこと。
- 2) 本研究塗膜のひび割れを FRPM 管のたわみ率 5%前後で発生させる。
- 3) 点検時の塗膜面を簡単、短時間、安価に清掃する方法の考案。
- 4) 本研究工法における劣化部分の点検の為に紫外線照射器の仕様設計、及び製作。

R&D の具体的内容

1) 気温 5℃湿度 80%環境で、下塗り塗装後に 18 時間以内で上塗り塗装が可能な塗料の開発
 ① 「ひび割れ検出下塗り塗料」、「ひび割れ検出上塗り塗料」を FRPM 管に積層塗布した塗膜が、FRPM 管のたわみ率 5%前後でひび割れを生じ、そこに紫外線を照射すると明瞭に発光し、更に気温 5℃、湿度 80%の環境でも塗装可能な塗料を開発する。1 層目は FRPM 管の内面を覆っている FRP 層の含浸材料の不飽和ポリエステル樹脂に付着(付着強度は樹脂モルタルと FRP 保護膜との付着強度を超えること)し、FRPM 管が 30%の圧縮変形を受けた時にも亀裂が入らない弾性を有し、蛍光顔料が均一に分散され、気温 5℃、湿度 80%において FRPM 管に塗装後 18 時間以内に硬質上塗り塗料が塗装できる透明耐水塗料(下塗り塗料)を試作した。一般に軟質のエポキシ塗料の硬化速度は遅く、湿潤状態で、気温が低いと尚更である。この問題点の解決策としてエポキシ樹脂の硬化剤をポリアミンやポリアミドではなく、湿度によりアミンが大量に放出され硬化に有利に働くケチミンタイプを選定した。次に 2 層目は 1 層目の塗料に付着し、FRPM 管のたわみ率が 5%前後で塗膜に亀裂が入る高硬度で紫外線を遮断する顔料が均一に分散され、気温 5℃、湿度 80%において 18 時間以内に成膜できる着色された耐水塗料(上塗り塗料)を試作した。これらの塗膜形成が可能なことは社内試験で

確認した。(Fig. 5) インキュベータで温度 5℃と設定し、タッパーに水蒸気を入れて湿度を 85%に近づけ、そのタッパーにアンダーコートを塗った FRPM 管を入れて、データロガーで、定期的に温度と湿度を記録しながら 18 時間経過後にトップコートが塗布可能かを確認した。



Fig.5 ひび割れ検出上塗り塗料を塗布し 18 時間放置

塗膜には粘着性が残っていたが、指触で指紋は塗料は付かなかった。その上に「ひび割れ検出上塗り塗料」を塗布したが、問題なく塗布は可能であった。(Fig. 6)



Fig.6 ひび割れ検出上塗り塗料を塗布

②FRPM 管の表層の不飽和ポリエステルと、本研究の「ひび割れ検出下塗り塗料」、「ひび割れ検出上塗り塗料」の蒸留水、塩化ナトリウム水溶液 (10W/W%)、硫酸 (30W/W%)、水酸化ナトリウム水溶液 (10W/W%) の耐薬品性試験を日本塗料検査協会で行った。それらの耐薬品性試験において質量変化は±0.3%未満で、下水道用コンクリートの防食被覆材の規格に合格した。(Fig. 7)

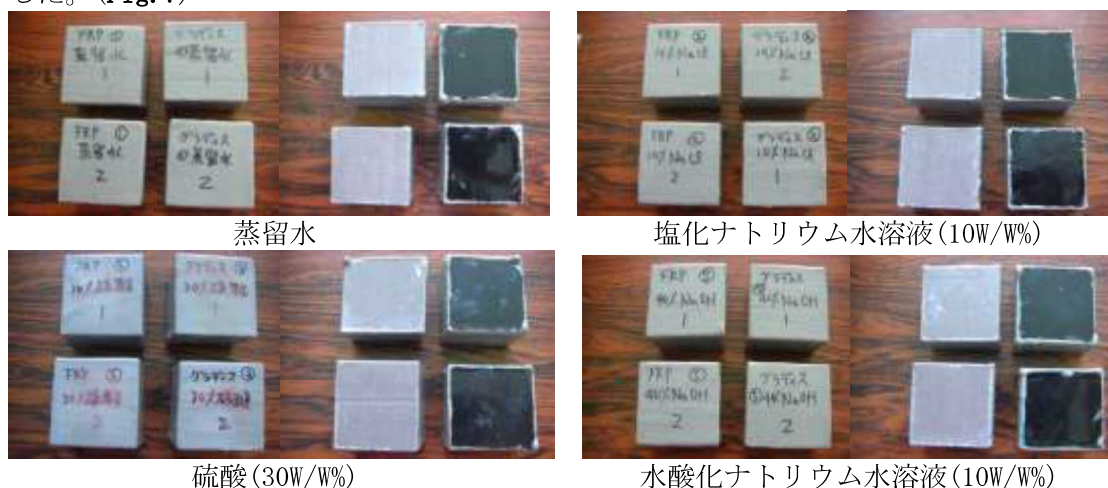


Fig.7 耐薬品性試験結果

③「ひび割れ検出上塗り塗膜」と FRPM 管製造に使用される不飽和ポリエステル樹脂を耐摩耗試験 (JIS K 7204) において、「ひび割れ検出上塗り塗膜」の摩耗質量が不飽和ポリエステル樹脂より同等か少ないこと。これは不飽和ポリエステル樹脂を平板に塗布した試験体を積水化学工業 (株) に作成を依頼入手し、本塗料との比較実験を外部試験所で行ったテーパー式 500 回転の摩耗試験を行った。結果は摩耗質量の平均値は本塗料が 0.077g、不飽和ポリエステル樹脂が 0.122g で重量において本開発塗料 (ひび割れ検出上塗り塗膜) は不飽和ポリエステル樹脂の 63%の摩耗量であった。ここで、摩耗深さは塗料の比重を加味しなければならない。不飽和ポリエステル樹脂の比重はほぼ 1 g/cm^3 、本研究の上塗り塗料は 1.56 g/cm^3 であるので、不飽和ポリエステル樹脂の 41%の摩耗深さであった。(Fig. 8)



Fig.8 耐摩耗試験体
(テーパー式 500 回転)

2)F/S ではたわみ量が 8%で上塗り塗膜にひびが生じた。これをたわみ率が 5%と低く設定した時にひび割れが入るように、塗膜に脆さを与える設計を行なった。具体的には現行の塗料に脆さを付与するために添加している無機フィラーであるシリカ系の珪砂の量を増やすことと、フィラーの形状を球形のものにすることで対応した。

上述の2層の塗料を管内径 500mm×幅 150mmの FRPM 管内面に試作開発した弾性下塗り塗料を 400 μ m、硬質上塗り塗料を 200 μ mにて塗装し、常温で1週間養生したものを、産学官委員会の一員である名古屋市工業研究所が所有する変位-荷重計（オートグラフ）に円筒方向を変形させる様に設置して荷重をかけた。5 mm/min の速度で加圧し、4min 後、約 20 mmの加圧にて円筒下部にうっすらと 1 本の亀裂が入り始めた。更に加圧を続けると 22 mm加圧で亀裂が明確に発光し始め、25 mm加圧時点では管内面に 1 本の明瞭に発光する亀裂が発生した。25 mm加圧は Φ 500 の FRPM 管の 5%のたわみ量となる。 (Fig.9)

ほぼ、要求性能であるたわみ率 5%前後でひび割れることが確認できた。また、亀裂は紫外線により明瞭に発光することも確認できた。



Fig.9 5%のたわみ量で亀裂が発光

本研究塗膜は F/S で開発したものと異なるので、FRPM 管への付着力を確認した。試験方法は建研式引張り試験で行った。3 検体の付着強度の平均は 4.21N/mm² で付着状態は塗膜内破壊であった。(Fig.10) F/S では 3 検体の付着強度の平均は 4.53N/mm² で付着状態は基材破壊であった。付着力が下がった理由は上塗り塗料により多くの無機フィラーがはいること、塗膜が脆くなったことが考えられる。付着状態も基材破壊ではなく塗膜内破壊なのはその理由であると推測できる。

しかし、この付着力はコンクリート防食協会における下水道用コンクリートの防食被覆材の規格で A 種塗布型ライニング工法と B 種塗布型ライニング工法で付着強度の合格値が 1.5 N/mm² に対して倍以上の付着強度があるので本塗料は十分に実用可能と考える。

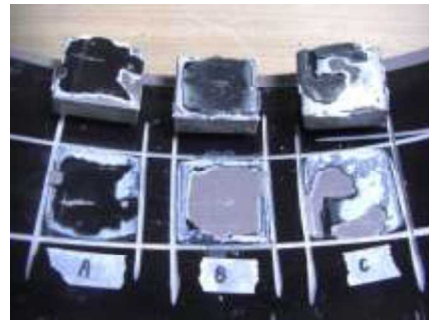
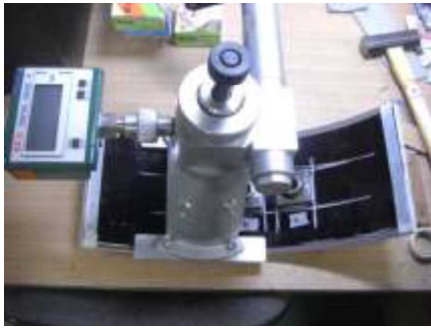


Fig.10 新品のFRPM管での新塗料の付着力試験

3) 点検の為の本研究開発塗装後に付着した汚れの洗浄方法の開発

本研究塗料を塗布したFRPM管は一度供用されると、管内部には有機物の汚れが付着していく。点検の際に紫外線での塗膜ひび割れの発光確認の為に、点検前に清掃を行う必要がある。

F/Sでは、本研究の塗料を塗装する前処理としてFRPM管に付着した有機物の簡便な洗浄方法として、温水高圧洗浄機と強アルカリ界面活性剤にて簡単に行えることを検証した。しかし、強アルカリ界面活性剤を使用すると汚水の中性化処理をする必要がある。R&Dでは界面活性剤を中性のものを選択し、それを泡状にして汚れに吹き付け、数分放置した後に温水洗浄すれば、強アルカリのものと同じ効果が得られた。30年供用されたFRPM管の堀上管のカットサンプルを積水化学工業(株)から提供を受け、ケルヒージャパン(株)の名古屋ラボにて中性の洗浄用界面活性剤の汚れへの浸透時間を延長させ、温水高圧洗浄機のボイラー温度、吐出圧力、ノズル先端形状とノズルとFRPM管との距離等の条件を新たに設定することで、付着した汚れが落ちることを確認した。界面活性剤を使用した温水高圧洗浄でも、「ひび割れ検出塗膜」には変色も剥がれもなく異常は観察できなかった。(Fig. 11)

この方法を用いることで、本研究塗装がされたものの点検時には汚れを簡単に安全に落とすことができると推測される。



Fig.11 中性洗剤と温水高圧洗浄機によるFRPM管洗浄テスト

4) 紫外線照射器の仕様設計と製作

本研究は特殊な塗装を行ない、その後紫外線の照射により劣化点検を行なうことで成り立つものである。その点検には点検者が可搬できる軽量小型の紫外線照射器が必要である。以前は紫外線を照射するには高圧水銀ランプやメタルハライドランプを用いることが必要であった。それらは重く、AC100VやAC200Vの外部電源が必要で点検者が可搬できるものではなかった。しかし、現在は紫外線を照射可能なLEDが開発され、それらを用いた照射器が販売されている。ところが、それらは乾電池を電源とした懐中電灯型の近距離を短時間照射することしかできないものである。そのため、本研究の実用化には点検者が可搬可能な小型軽量で強力な光量を有し、広角の照射及び、その照射角度の調整ができ 且つ 連続照射が8時間以上可能な紫外線照射器の製作が必要であった。必要なスペックを当社において仕様設

計を行い外注にて製造を行なった。

紫外線を照射可能なLEDは小型で、耐衝撃性があり、さらに光量もあり、しかし消費電力が少ないという多くのメリットがある。昨今、365nm, 385nmの紫外線波長が照射できるLEDが市販されている。今回はより紫外線波長の365nmのLEDを選択した。また、対象とするFRPM管は様々なので直径によって、照射範囲の調整ができる機能（レンズと光源との距離調整機能）を設ける。照射器と電源は別体とし、電源は発電機を用いるのではなくバッテリーを使用する。市販品のリチウムイオンバッテリーの中で、なるべく軽量で長時間の使用に耐えうる本仕様に合ったもので、照射器メーカーで実績のあるものを選択し（Fig.12）、組み合わせ完成させた。紫外線照射ランプヘッドは点検者が手で持つので極力軽量とし、電源はバックパック等に入れて作業者が背負う形のもの（Fig.13）を、365nm波長の60Wタイプ（小型リチウムバッテリー要）で開発し、遠距離用長時間照射可能な紫外線照射器（Fig.14）とした。また、より軽装備で部分的な点検を行う場合も想定し、365nm波長の6Wタイプと250Wタイプ（電池タイプ）で、焦点距離が可変できるタイプの紫外線照射器（Fig.15）も製作した。



Fig.12 小型リチウムイオンバッテリー



Fig.13 点検風景



Fig.14 遠距離用紫外線照射器



Fig.15 近距離用紫外線照射器



5) 今後の課題

現場ニーズとして、下塗り塗料を塗装後にすぐに上塗り塗料を塗布できないかという要望が新たにあったので、下塗り塗料を紫外線硬化型塗料にできないかの研究を始め、UV硬化装置を使用して下塗り塗料を硬化させ、引張試験機で塗膜の伸びを実験した。しかし、弾性がなかなか得られず、まだ研究途中である。

また、塗料の粘度が高くスプレー塗装はできないので、スプレー塗装が可能になるように更に粘度を下げる研究も継続中である。

7. 研究成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍又は雑誌名（雑誌のときは雑誌名、巻号数、論文名）	刊行年月日	刊行書店名	執筆者氏名
------------------------------	-------	-------	-------

第 10 回学術講演会論文集、コンクリート構造物のひび割れを検出する塗装塗膜、PP85-86	平成 28 年 3 月 9 日	公益社団法人 日本材料学会東海支部	高橋 康一
--	-----------------	-------------------	-------

8. 研究成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の種類、番号	出願年月日	取得年月日	権利者名
強化プラスチック複合管用製造方法	特 願 2014-204396	2014 年 10 月 3 日		高橋康一

9. 成果の実用化の見通し

セキスイ管材テクノックス株式会社と今後の実用化を視野に検討中である。